

## **ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СПОСОБОВ СНИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ РАЗБОРНЫХ КОНТАКТНЫХ СОЕДИНЕНИЙ В СИЛОВЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ**

Значительное число неполадок и отключений в электрических сетях, как свидетельствует статистика, связано с работой разборных контактных соединений (РКС). Как известно, эти устройства представляют собой участки электрической цепи с повышенным, часто нестабильным электрическим сопротивлением, которое можно представить в виде:

$$R_{PKC} = R_{K-\partial} + R_{пер},$$

где  $R_{K-\partial}$  – собственное сопротивление контакт-деталей;  $R_{пер}$  – переходное сопротивление на участке, где соприкасаются прижатые друг к другу токопередающие поверхности.

Если рабочие поверхности РКС соединить без предварительной зачистки и обработки, то  $R_{PKC}$  в десятки раз превысит сопротивление участка токопровода такой же длины, причем  $R_{пер} \gg R_{K-\partial}$ . т.е. можно утверждать, что  $R_{PKC} = R_{пер}$ . Это объясняется наличием на рабочих поверхностях контакт-деталей оксидных пленок, которые образуются на поверхности всех металлов и часто представляют собой диэлектрик.

Исследования в этой области проводятся главным образом в двух направлениях: 1) оптимизации существующих и разработки новых конструкций РКС; 2) поиска новых способов подготовки и обработки рабочих поверхностей контакт-деталей. Учитывая огромное количество РКС в электрических сетях, наиболее перспективны исследования, направленные на модернизацию уже используемых на действующих объектах электроэнергетики РКС без существенного изменения их конструкции.

Показателем экономичности и надежности работы РКС являются величина и стабильность на уровне, соответствующем уровню при первоначальной сборке, в течение всего срока эксплуатации.

В настоящее время известно несколько способов снижения  $R_{пер}$  РКС. На практике наиболее часто используют способ нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей защитных металлопокрытий (сплавов: олово – свинец, олово – цинк, олово – медь, а также металлов: серебра, кадмия, никеля). Их оксидные пленки имеют большую электропроводность, чем у меди и алюминия, из которых изготавливают эти контакт-детали. Критерии выбора материалов металлопокрытий и технология их нанесения подробно изложены в [1]. Однако такая технология связана либо с нагревом контакт-деталей до температуры 350–400°С, либо с применением специального оборудования (гальванического, электроискрового, плазменного напыления), что во многих случаях, особенно в условиях эксплуатации на действующем электрооборудовании, исключает возможность их использования. Недостатком этого способа является применение его главным образом в условиях стационарного производства на заводах – изготовителях электротехнического оборудования. Поэтому сотни тысяч РКС на ЛЭП, в контактной сети электрифицированного железнодорожного и городского транспорта, на подстанциях и в распределительных устройствах эксплуатируются без каких-либо металлопокрытий.

Для снижения и стабилизации  $R_{PKC}$  используется также предельно простой способ уменьшения  $R_{PKC}$  путем нанесения на токопередающие поверхности контакт-деталей токопроводящих смазок типов Суперконт, Электроконт и многих других, разработанных в России и за рубежом [2]. Однако следует отметить, что токопроводящие смазки – недолговечные покрытия, так как имеют в своем составе жидкую фракцию, которая в процессе эксплуатации высыхает или вымораживается, после чего смазка теряет защитные свойства. Кроме того, с ростом нагрева РКС смазка пригорает к рабочим поверхностям контакт-деталей, что затрудняет при ревизии ремонт РКС.

Известен также разработанный на кафедре Электротехники и электротехнологических систем Уральского энергетического института способ снижения электрического сопротивления в РКС с помощью защитных металлопокрытий на токопередающих поверхностях контакт-деталей, полученных путем использования легкоплавких сплавов на основе галлия или висмута [3, 4]. Технология нанесения этого металлопокрытия может применяться как в условиях монтажа, ремонта и эксплуатационного обслуживания действующего электрооборудования, так и в условиях стационарного производства электротехнического оборудования на предприятиях.

Технические характеристики РКС с защитными металлопокрытиями, нанесенными по данной технологии, подтверждены в процессе длительных испытаний как в лабораторных условиях, так и в условиях эксплуатации на отдельных объектах электроэнергетики. В таблице представлены сравнительные результаты измерений величины и уровня стабилизации электрического сопротивления РКС с различными вариантами материалов контакт-деталей и защитных металлопокрытий.

Таблица

Результаты анализа стабилизации электрического сопротивления РКС с разными видами покрытия контакт. деталей

№ п/п	Материал шин	Вид покрытия	Дата измерения $R_{PKC}$ , мкОм					
			11.06.04	10.03.05	11.05.05	12.10.05	11.05.06	29.06.07
1	Cu	лужение	15,5	15,1	15,5	14,5	15,5	15,4
	Cu	лужение						
2	Cu	покрыт.	12,8	12,6	12,6	12,8	14,3	14,2
	Cu	покрыт.						
3	Cu	лужение	25,3	46,4	51,6	57,0	65,4	73
	Al	без покрыт.						
4	Cu	покрыт.	14,6	14,5	14,4	14,8	15	14,9
	Al	покрыт.						
5	Al	покрыт.	17,1	16,0	15,8	15,7	16	16
	Al	покрыт.						
6	Al	без покрыт.	220,5	273,0	279,1	275,3	288,9	294,3
	Al	без покрыт.						

Общим недостатком всех РКС является то, что их стальной крепеж (болты, гайки, шайбы), которые обеспечивают необходимое нажатие рабочих поверхностей контакт-деталей друг к другу и имеют с ними механический контакт, практически не участвуют в процессе передачи тока. Это объясняется тем, что крепежные детали в РКС сделаны из стали, удельное сопротивление которой в 7–9 раз больше, чем у меди и алюминия, а поверхности соприкосновения крепежных деталей и контакт-деталей покрыты оксидными пленками, следовательно, между ними практически нет электрического контакта.

Описанная выше технология нанесения защитных металлопокрытий позволила предложить способ дальнейшего снижения электрического сопротивления РКС с помощью использования крепежа в качестве дополнительного пути для прохождения электрического тока между контакт-детальями [5]. Эта задача решается благодаря тому, что в разборном контактном соединении на токопередающие поверхности наносят защитное металлопокрытие, а крепежные детали выполняют из цветного металла, на их поверхности также наносят защитное металлопокрытие. В РКС с медными контакт-детальями крепежные детали изготавливают из медного сплава (латунь, бронза), а в РКС с алюминиевыми контакт-детальями – из алюминиевого сплава (дюраль).

На рисунке, показаны принципиальные схемы РКС двух типов, широко применяемые в силовых электрических цепях. Благодаря рисунку видно, что использование цветного крепежа – болта/шпильки 4, гайки 5, шайбы 6 и нанесение на поверхности его деталей (соприкасающихся с крепежными поверхностями 3 контакт-деталей) защитного металлопокрытия 7, которое создает хороший электрический контакт между ними, обеспечивает возможность протекания тока не только через рабочие поверхности 2 контакт-деталей, но и через детали крепежа. Это позволяет уменьшить общее электрическое сопротивление РКС, а следовательно, и потери электроэнергии в нем. В РКС на рисунке второго типа (рис.б) отверстия в одной полярности контакт-деталей 1, в которые вворачиваются крепежные шпильки, выполнены резьбовыми. При такой конструкции улучшается электрический контакт шпильки с этой контакт-деталью, кроме того, восстанавливается объем металла в отверстиях контакт-детали, а значит, увеличивается ее сечение и снижается собственное электрическое сопротивление. В итоге это способствует уменьшению полного электрического сопротивления РКС.

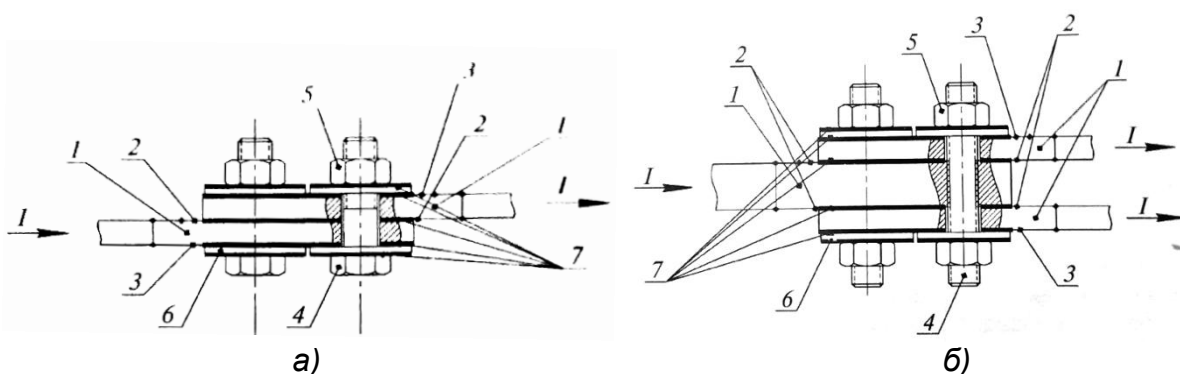


Рис. Принципиальная схема РКС: а) с болтовым крепежом; б) со шпильками

Лабораторные исследования показали, что электрическое сопротивление предложенной конструкции РКС на 50–70 % меньше, чем у РКС со стальным крепежом. Дополнительное преимущество применения цветного крепежа вместо стального – отсутствие в РКС магнитных (гистерезисных) потерь энергии на переменном токе.

Показателем надежности РКС является сохранение стабильности его электрического сопротивления на уровне, соответствующем уровню при первоначальной сборке, в течение всего срока эксплуатации. При этом важнейшее условие – обеспечение постоянного контактного нажатия при работе в различных температурных режимах [6]. Указанное можно реализовать, например, применяя крепеж из материалов, имеющих коэффициент линейного теплового расширения, близкий к коэффициентам материалов (меди, алюминия и сплавов на их основе), из которых изготавливаются контакт-детали. Следовательно, применение в РКС крепежа из высокопрочного алюминиевого сплава (для соединения алюминиевых контакт-деталей) или из высокопрочной бронзы и латуни (для соединения медных контакт-деталей) вместо стального позволяет повысить стабильность контактного нажатия в различных температурных режимах. Наибольший эффект от применения предложенной конструкции РКС можно получить в силовых цепях (питание электролизеров, печей в цветной металлургии) на токи от нескольких десятков до трехсот кА, в которых РКС содержат большое количество крепежных деталей.

Известные представления о прохождении электрического тока в РКС показывают, что токопередача между рабочими (токопередающими) поверхностями контакт-деталей происходит через отдельные, разрозненные пятна, которые представляют собой металлические мостики. Общая поверхность этих пятен на два порядка меньше геометрической рабочей поверхности РКС, и величина ее в каждом конкретном соединении неизвестна [7, 8]. Поэтому в ГОСТах и справочной литературе нет рекомендаций по выбору допустимой плотности тока в РКС. В этой ситуации продолжение экспериментальных исследований работы РКС является задачей весьма актуальной. Цель этих исследований – получить достоверные статистические данные, на базе которых может быть разработана методика расчета РКС. Эта методика позволит на стадии проектирования электрических цепей рассчитать потери электроэнергии в этих устройствах, определить допустимую плотность тока и оптимальные размеры РКС с учетом материалов контакт-деталей, уровня подготовки их рабочих поверхностей и марки защитных металлопокрытий.

#### Список использованных источников

1. Петрунин И. Е. Справочник по пайке. 3-е изд. М.: Машиностроение, 2003.
2. Дзекцер Н. Н., Авраменко Г. Ю. Энергетическая безопасность и повышение надежности электрических контактов. СПб.: ООО «ИЭЦ-Контакт», 2011.
3. Патент на изобретение 2301847 РФ. Способ нанесения металлического покрытия на токопередающие поверхности разборных контактных соединений / Г. Н. Перельштейн, А. В. Печеркин, С. Г. Хронусов. Оpubл. в бюл. 2007. № 18.
4. Патент на изобретение 2516189 РФ. Способ нанесения металлического покрытия на токопередающие поверхности разборных контактных соединений / В. В. Гоман, Г. Н. Перельштейн, Ф. Н. Сарапулов, С. А. Федореев. Оpubл. в бюл. 2014. № 14.
5. Патент на полезную модель 141044 РФ. Разборное контактное устройство / Р. Р. Мухаметов, Г. Н. Перельштейн, Ф. Н. Сарапулов. Оpubл. в бюл. 2014. № 15.
6. ГОСТ 10433-82. Соединения контактные электрические. Классификация. Общие технические требования.
7. Хольм Р. Электрические контакты. М.: Ин. лит., 1961.
8. Мышкин Н. К., Браунович М., Кончиц В. В. Электрические контакты. Долгопрудный: ИД «Интеллект», 2008.